

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Daniel Butković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Biserka Runje, dipl. ing.

Student:

Daniel Butković

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

DANIJELO BUTKOVIĆ

Mat. br.: 0035184133

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**RAČUNALNA TOMOGRAFIJA U DIMENZIONALNOM
MJERITELJSTVU POTPOMOGNUTA SIMULACIJAMA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**SIMULATION-AIDED COMPUTED TOMOGRAPHY FOR
DIMENSIONAL MEASUREMENTS**

Opis zadatka:

Primjena računalne tomografije (CT) u dimenzionalnom mjeriteljstvu novo je i relativno neistraženo znanstveno područje. Mjeriteljski CT uređaji omogućuju mjerenje kako vanjske tako i unutarnje geometrije i strukture predmeta mjerenja beskontaktnom tehnikom skeniranja. Radi se o složenom mjernom sustavu s velikim brojem ulaznih veličina koji se uobičajeno konfigurira primjenom numeričkih simulacija.

U radu je potrebno istražiti mogućnosti primjene simulacija u području utvrđivanja i analize utjecajnih veličina CT mjernog sustava. U eksperimentalne svrhe koristiti CT mjerni uređaj XT H 225 koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

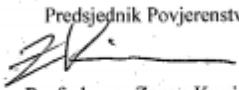
Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Biserka Runje

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Biserki Runje, dipl. ing. na znanstvenoj i stručnoj potpori tijekom rada. Zahvaljujem se asistentici Amaliji Horvatić na strpljenju, pomoći, savjetima i komentarima prilikom izrade ovog završnog rada te na ustupljenim rezultatima CT mjerenja. Također se zahvaljujem Dr.-ing. Carsten Bellonu na pomoći pri korištenju softvera aRTist koji je opisan u okviru ovog završnog rada.

Potpis

Sadržaj

Popis slika.....	I
Popis tablica.....	II
Popis oznaka.....	III
Sažetak.....	IV
Abstract.....	V
1. Uvod.....	1
2. Računalna tomografija	2
2.1. Princip rada industrijskih CT uređaja	2
2.2. Klasifikacija industrijskih CT uređaja	3
2.3. Prednosti i nedostaci CT uređaja	5
2.4. Primjena.....	5
3. Dijelovi CT sustava za dimenzionalna mjerenja.....	7
3.1. Hardware	7
3.1.1. Izvor rendgenskih zraka	7
3.1.2. Detektori rendgenskih zraka.....	10
3.1.3. Rotacioni stol.....	11
3.1.4. Kinematski sustav	12
3.2. Softver	13
3.2.1. Softver za 3D rekonstrukciju i detekciju rubova.....	13
3.2.2. Softver za vizualizaciju i dimenzionalnu analizu.....	14
4. Utjecajni parametri CT sustava	16
4.1. Meta zračenja.....	16
4.2. Snaga izvora	17
4.3. Utjecaj temperature.....	18
4.4. Položaj, geometrija, orijentacija i materijal objekta	19
4.5. Filter.....	20
4.6. Uvećanje	20
4.7. Broj projekcija i vrijeme snimanja	21
5. Simulacije u računalnoj tomografiji	22
5.1. Opis postupka	22
5.2. aRTist.....	23
5.2.1. Korisničko sučelje <i>aRTist</i> -a.....	23

5.2.2.	Geometrijski model	26
5.2.3.	Model procesa prodiranja rendgenskih zraka.....	26
5.2.4.	Prednosti i nedostaci korištenja simulacija	26
6.	Eksperimentalni dio.....	29
6.1.	Dimenzionalna analiza pomoću simulacija	29
6.2.	Dimenzionalna analiza pomoću CT uređaja.....	31
6.3.	Usporedba rezultata dobivenih simulacijama i CT mjerenjima	32
6.3.1.	Duljina i koncentričnost	32
6.3.2.	Odstupanja od točnih vrijednosti.....	33
7.	Zaključak	36
8.	Literatura	37

Popis slika

Slika 1. Shema linijskog skenera [1]	4
Slika 2. Shema konusnog skenera [1].....	4
Slika 3. CT sustav za dimenzionalna mjerenja Nikon XT H 225	7
Slika 4. Spektar rendgenskog zračenja [1]	8
Slika 5. Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [2].....	9
Slika 6. Unipolarni oblik cijevi	9
Slika 7. Bipolarni oblik cijevi.....	10
Slika 8. Detektor izveden u obliku ravne ploče.....	10
Slika 9. Linijski detektor	10
Slika 10. Postavljanje geometrije sustava prilikom skeniranja [3].....	11
Slika 11. CT snimak s odstupanjem od 10 piksela [3]	11
Slika 12. CT snimak s odstupanjem pomaka oko x- osi detektora [3]	12
Slika 13 Postavljanje osi na industrijskim skenerima [2].....	12
Slika 14. Definicija vokseli [3]	13
Slika 15. Ishikawa dijagram utjecajnih parametara CT uređaja u dimenzionalnom mjeriteljstvu	16
Slika 16. Utjecaj jakosti struje i napona na intenzivnost [2]	18
Slika 17. Utjecaj temperature na stabilnost materijala mete [3].....	19
Slika 18. Utjecaj uvećanja na pojavu zamagljenja na skenu [3]	21
Slika 19. Korisničko sučelje aRTist-a	23
Slika 20. Postavke izvora zračenja u aRTist-u	24
Slika 21. Parametri detektora u aRTist-u	25
Slika 22. Moduli CTScan, Solid, ImageViewer u aRTist-u	25
Slika 23. Aluminijski cilindar.....	29
Slika 24. Dimenzije promjera pri udaljenosti od 200 mm.....	30
Slika 25. Duljina i vanjski promjer pri udaljenosti od 300 mm	30
Slika 26. Usporedba izmjerenih duljina cilindra	32
Slika 27. Usporedba koncentričnosti cilindra.....	33
Slika 28. Odstupanja vanjskog promjera cilindra od prave vrijednosti.....	34
Slika 29. Odstupanje koncentričnosti od prave vrijednosti	34

Popis tablica

Tablica 1. Primjena CT [3]	6
Tablica 2. Konstantni parametri prilikom mjerenja	29
Tablica 3. Rezultati mjerenja pomoću simulacija	31
Tablica 4. Značajke CT uređaja Nikon XT H 225 [9].....	31
Tablica 5. Rezultati mjerenja na CT uređaju Nikon XT H 225.....	32

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
h	Js	Planckova konstanta ($6,64 \times 10^{-34}$ Js)
c	ms^{-1}	brzina svjetlosti ($3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$)
E	J	energija svakog fotona
P	W	snaga izvora zračenja
U	kV	napon na izvoru
I	μA	jakost struje na izvoru
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura okoliša
E_N	keV	energetski nivo
\overline{FO}	mm	udaljenost između fokusa izvora i objekta
\overline{FD}	mm	udaljenost između fokusa izvora i detektora

Sažetak

Tema ovog završnog rada je korištenje simulacija u svrhu analize utjecajnih parametara prilikom korištenja CT uređaja u dimenzionalnome mjeriteljstvu. U radu je ukratko opisan postupak skeniranja proizvoda pomoću CT uređaja, rekonstrukcija dobivenih snimaka, komponente CT uređaja, te utjecajni parametri. To su sve čimbenici koji utječu na mogućnost korištenja simulacija, koje su također opisane u jednom od poglavlja. Za opis simulacija korišten je BAM-ov software *aRTist*. Da bi razumjeli simulacije potrebno je shvatiti proces sam po sebi, pa je zato nužno poznavati proces računalne tomografije.

Tehnologija sama po sebi se još razvija i nužno je ispitati kako sve pojedini parametri mogu utjecati na rezultate naših mjerenja (npr. snaga izvora, tip detektora, razlučivost). Da bi se dobio odgovor potrebno je provesti velik broj mjerenja pri velikom broju različitih uvjeta. Problem je u tome što provođenje takvih istraživanja iziskuje veliko vremensko razdoblje. Tu nam mogu pomoći simulacije, pošto simulacija mjerenja traje puno manje od samog mjerenja i analize. U ovome rade moguće je vidjeti način na koji se obavljaju simulacije, te također u eksperimentalnome dijelu rada se može vidjeti razlika u mjerenjima između simuliranih uvjeta i uvjeta u stvarnome mjernom okruženju.

Ključne riječi : računalna tomografija, dimenzionalno mjeriteljstvo, simulacije u računalnoj tomografiji

Abstract

The subject of this undergraduate thesis is the use of simulations for the purpose of analyzing the determining factors while using an industrial CT in dimensional metrology. This thesis shortly describes scanning of an object using an industrial CT, reconstruction of scanned images, components of CT system, and the determining factors. Those are all factors which influence possibility of usage of the simulations, which are also described in one of the chapters. For the description of simulations software *aRTist* was used which was developed by BAM. To understand the simulations it is necessary to understand the process of scanning by itself, for which is necessary to know the process of computed tomography.

The technology is still developing so it is necessary to examine the influence of parameters on the results of our measurements (i.e. source power, detector type, resolution). To get an answer it is necessary to carry out a great number of measurements under a great number of conditions. The problem is that kind of research takes a lot of time. Therefore, we can use simulations, since the simulation of a measurement takes a lot less time than the process of measurement and analysis itself. In this thesis it is possible to see the way these simulations work, and also in the experimental part of this thesis the difference of measurements in a simulated environment and a real one.

Keywords : computed tomography, dimensional metrology, simulations in computed tomography

1. Uvod

Računalna tomografija je metoda koja koristi rendgenske zrake za snimanje velikog broja dvodimenzionalnih (2D) prikaza predmeta pri različitim kutevima gledanja. Dobiveni 2D zapisi se zatim softverski prevode u 3D prikaz skeniranog predmeta. Riječ "*tomografija*" dolazi od dvije grčke riječi, "*tomos*" što znači presjek, odsječak; te riječi "*graphein*" što znači pisati. Računalna tomografija je metoda koja omogućuje istovremeni uvid u vanjsku i unutarnju strukturu ispitivanog predmeta.

Ideju da se unutrašnjost strukture predmeta može odrediti pomoću više rendgenskih snimaka, i iz različitih kuteva, razradio je Godfrey Hounsfield dok je radio za EMI Group Limited u Ujedinjenom Kraljevstvu. Hounsfield nije u to vrijeme imao saznanja, da je u isto vrijeme dok je on izrađivao svoj prvi sustav, Allan Cormack sa Sveučilišta Tufts u Sjedinjenim Američkim Državama radio na teoriji o takvom uređaju. Godine 1979. Hounsfield i Cormack dobili su Nobelovu nagradu na području fiziologije i medicine, za njihov doprinos u razvoju CT (*Computed Tomography*) uređaja [1]. Prvi CT uređaj doveden je u uporabu 1971. godine. Prvi snimak bio je na pacijentu u bolnici Atkinson Morley u Wimbledonu (Ujedinjeno Kraljevstvo) koji je imao cistični tumor prednjeg režnja. Poslije toga, CT je odmah prihvaćen u medicini i često se spominje kao najvažnije otkriće u radiologiji od otkrića rendgenskih zraka. Prva primjena CT uređaja u industriji vuče svoje korijene u početke 1980-ih godina 20. stoljeća, u području nerazornih ispitivanja i analize materijala, za proučavanje unutarnje strukture materijal. CT tehnologija ušla je u uporabu u mjeriteljstvu kao alternativa taktilnim i optičkim trokoordinantnim mjernim sustavima. Prvi pokušaji provođenja dimenzionalnih mjerenja pomoću CT uređaja su se pojavili početkom 90-ih godina, no točnost nije bila bolja od 0,1 mm. Važan pomak u tehnologiji se pojavio 2005. godine, kada je na Sajmu upravljanja u Njemačkoj predstavljen prvi dimenzionalni CT uređaj. Od tada do danas nekoliko većih proizvođača mjeriteljskih instrumenata počelo se baviti i razvojem te usavršavanjem uređaja za dimenzionalno mjerenje metodom računalne tomografije [2]. Neki od njih su: *Nikon, Carl Zeiss AG, GE, Skyscan, North Star Imaging...* Za sada, metoda dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom jest jedina 3D metoda koja je u mogućnosti mjeriti unutarnju isto kao i vanjsku strukturu bez potrebe za razaranjem komada. Kao takva, jedina je tehnologija za mjerenje dijelova koji imaju nepristupačnu unutarnju strukturu kao što su npr. dijelovi proizvedeni aditivnim postupcima, ili komponente sastavljene od više materijala [2].

2. Računalna tomografija

CT je uređaj koji ima mogućnost provjere vanjske i unutarnje strukture komada u raznim industrijskim primjenama kao i pružanje informacija o geometriji predmeta. CT je izvrsna novina u mjeriteljstvu iz razloga što omogućuje ispitivanje unutarnje geometrije predmeta proizvedenih aditivnim postupcima ili injekcijskim prešanjem više vrsta materijala, što za posljedicu ima puno lakšu geometrijsku i tolerancijsku kontrolu kvalitete. Dimenzionalni CT uređaj još je zanimljiv u pogledu kontrole kvalitete pojedinačnih dijelova sastavljenih u sklop, pošto se geometrija i dimenzije dijelova mogu razlikovati u sklopljenome i nesklopljenome stanju, npr. sklop može geometrijski pasti na provjeri iako su svi njegovi pojedinačni dijelovi u granicama zahtijevanih tolerancija kada se promatraju zasebno. Pošto je CT beskontaktna metoda mjerenja, može se uspoređivati i s drugim beskontaktnim metodama mjerenja kao što su npr. 3D skeneri. Još jedna bitna prednost računalne tomografije je u tome što je moguće provesti dimenzionalnu kontrolu kvalitete i kontrolu kvalitete materijala u isto vrijeme.

Iako se tri područja primjene (medicina, analiza materijala, dimenzionalno mjeriteljstvo) zasnivaju na istim fizikalnim i matematičkim principima, uređaji i procedura izvođenja se značajno razlikuju zato što trebaju ispuniti različite zahtjeve. U medicini doze radijacije, a s time i snaga, moraju biti smanjene da se zaštiti pacijent od opasnog zračenja. Objekt ispitivanja, u tome slučaju čovjek, se ne može okretati na isti način kao i uzorci, ili dijelovi u tehničkim CT uređajima. Također, točnost nije toliko bitna u medicini, dok je u industriji to itekako bitno. Isto tako u mjeriteljstvu je potrebna velika penetrirajuća snaga pošto su tu u pitanju objekti snimanja koji su puno veći, deblji, napravljeni od nepropusnih materijala (npr. metali). Nadalje, u dimenzionalnoj kontroli kvalitete potrebna je velika razlučivost i točnost uz uzimanje u obzir mjerne nesigurnosti i sljedivosti u SI sustavu. Iako je CT u primjeni već dosta dugo u medicini i analizi materijala, njegova primjena u dimenzionalnom mjeriteljstvu još uvijek je u razvoju te zahtijeva daljnja istraživanja s ciljem razvoja i poboljšanja same metode [1][2].

2.1. Princip rada industrijskih CT uređaja

CT uređaji sastoje se od više komponenti, no tri glavne su izvor zračenja, rotacioni stol na kojem je postavljen objekt, te detektor rendgenskih zraka. Princip na kojem se obavlja ozračivanje objekta je sljedeći: Izvor stvara rendgenske zrake. Kako rendgenske zrake prodiru

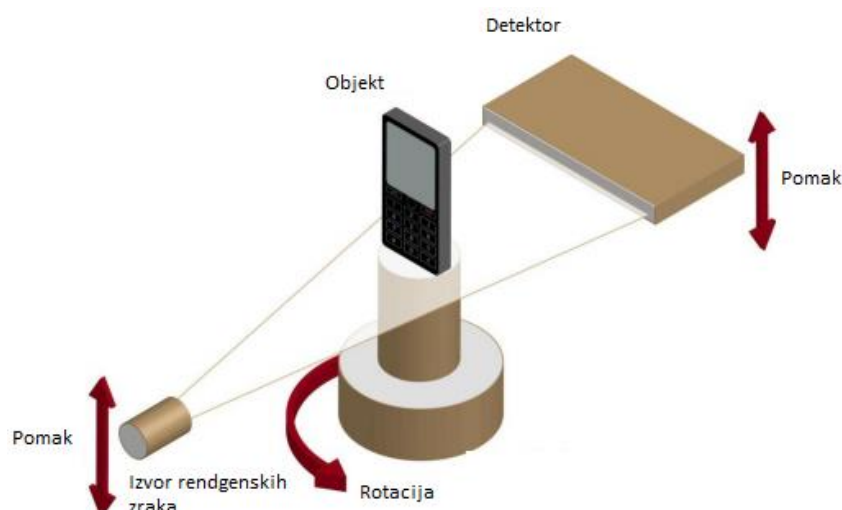
kroz objekt, postaju prigušene zbog apsorpcije i rasipanja zraka. Razina prigušenja zraka je određena duljinom prodiranja zraka u materijal, gustoćom materijala i kemijskim sastavom, i energijom rendgenskih zraka. Mjerenje tog prigušenja daje mogućnost detekcije materijala, kao i duljine prodiranja u različitim materijalima. Prigušenje se mjeri tako da se detektiraju preostale rendgenske zrake, koje putuju objektom, pomoću detektora zraka, što za rezultat ima dvodimenzionalnu sivu sliku u slučaju ravne ploče ili jednodimenzionalni sivi profil u slučaju jednodimenzionalnog linijskog detektora. Slike se snimaju iz različitih pozicija pogleda na objekt. Matematička rekonstrukcija projiciranih slika vodi trodimenzionalnome (3D) voksel modelu (voksel je 3D piksel), gdje je vrijednost sivila voksel mjera apsorpcije materijala. Idući koraci čine obradu voksel podataka, uključujući detekciju rubova objekta, te dimenzionalno mjerenje [2].

2.2. Klasifikacija industrijskih CT uređaja

Prema obliku rendgenskog snopa industrijski CT sustavi mogu se podijeliti na linijske i konusne, a zatim se još dodatno dijele prema nivou energije.

1) Linijski (line-beam) skeneri

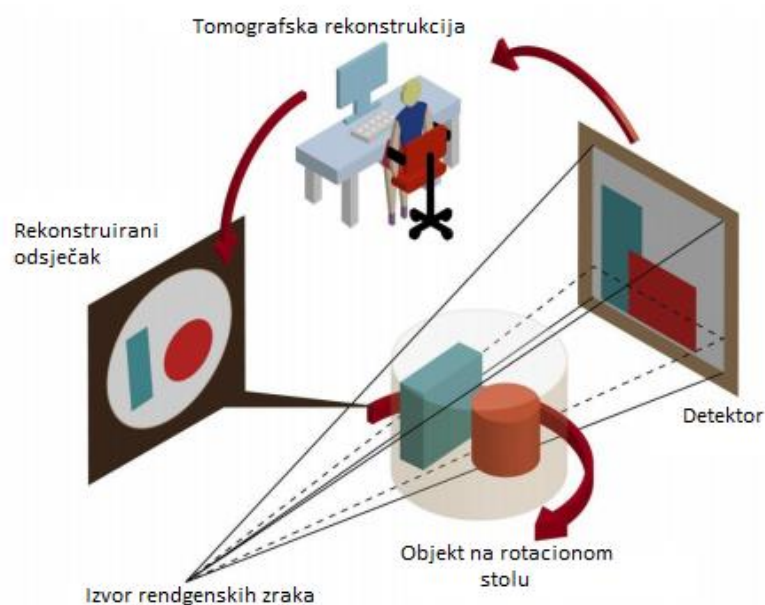
Ovi CT sustavi predstavljaju prvu generaciju skenera i koriste snop zraka za skeniranje volumena za vrijeme njegove rotacije. Svi dobiveni 2D snimci su iskorišteni za dobivanje 3D prikaza objekta. U ovom se načinu skeniranja obično koriste linijski detektori. Princip rada prikazan je na slici 1.



Slika 1. Shema linijskog skenera [1]

2) Konusni (cone-beam) skeneri

Konusni CT skeneri koriste konusni oblik rendgenskog snopa, za uzimanje preko tisuću snimaka objekta za vrijeme njegovog rotiranja. Dobiveni 2D prikazi se zatim obrađuju i prevode u 3D zapis. U ovim se tipovima skenera obično koriste detektori izvedeni kao ploča. Zraka prolazi kroz objekt i na detektor. Princip rada prikazan je na slici 2.



Slika 2. Shema konusnog skenera [1]

2.3. Prednosti i nedostaci CT uređaja

CT u industriji donosi mnoge prednosti, ali i nedostatke. Jedna od glavnih prednosti je u tome što se sve više koristi za nerazorna ispitivanja proizvoda. U dimenzionalnom mjeriteljstvu, ova beskontaktna metoda omogućuje mjerenje unutrašnjosti proizvoda s velikom preciznošću, bez razaranja objekta. CT snimak se sastoji od baze podataka velike količine mjernih točaka. Bilo koji drugi mjerni instrument ne može dobiti tako veliki broj površinskih točaka [3].

Prednosti :

- Mogućnost nerazornih ispitivanja za provjeru proizvoda
- Veliko smanjenje troškova provjere i analize
- Mogućnost brze i točne provjere oblika za vanjske i unutarnje komponente proizvoda
- Precizna mjerenja složenih unutarnjih komponenti bez razaranja predmeta
- Nije potrebno stezanje elemenata prilikom snimanja – to smanjuje pojavu oštećenja i deformacija
- Mogućnost reverzibilnog inženjerstva za predmete nedostupne geometrije
- Smanjenje razvojnih troškova kod kreiranja prvog CAD modela [1]

Nedostaci :

- Ne postoje standardni protokoli za ispitivanja
- Brojni utjecajni faktori utječu na mjerenja
- Smanjena mjerna sposobnost zbog grešaka u mjerenju
- Nepoznata mjerna sigurnost rezultata mjerenja
- Javljaju se problemi prilikom skeniranja više materijala u jednom proizvodu
- Sljedivost rezultata mjerenja do SI jedinice nije osigurana [3]

2.4. Primjena

Glavni interes za dimenzionalni CT u industriji je u nerazornim ispitivanjima grešaka na materijalu, te strukturi materijala unutar dijela, što se obično koristi u automobilske industriji za inspekciju i kontrolu kvalitete blokova motora, mjenjača brzina i ostale mehaničke uzorke. Dimenzionalni CT je u mogućnosti detektirati razlike u gustoći na postotnoj razini. Prema tome

se mogu dati kvalitativni iskazi o greškama. Zahvaljujući tehnologiji koja je napredovala, dimenzionalni CT se sada razvija za kvantitativne inspekcijske metode. Dimenzionalni CT sustavi ne samo da su u mogućnosti detektirati greške, nego također mogu dati informacije o veličini i rasporedu tih grešaka. Među ostalim primjenama nalazi se i prva kontrola koja je važna za detektiranje grešaka na proizvodu u ranoj fazi razvoja i s time povećanje produktivnosti procesa.

Pošto podaci iz CT-a sadrže potpune volumetričke podatke mjerenog objekta, moguće je, generirajući površine skeniranog volumena, odrediti koordinate mjerenog objekta. To znači da se CT može koristiti u dimenzionalnom mjeriteljstvu kao i koordinatni mjerni sustavi [3].

CT nalazi primjenu u raznim područjima :

- znanost o materijalima
- elektronika
- vojska
- medicina
- arheologija
- sigurnost
- zrakoplovna industrija
- automobilska industrija [3]

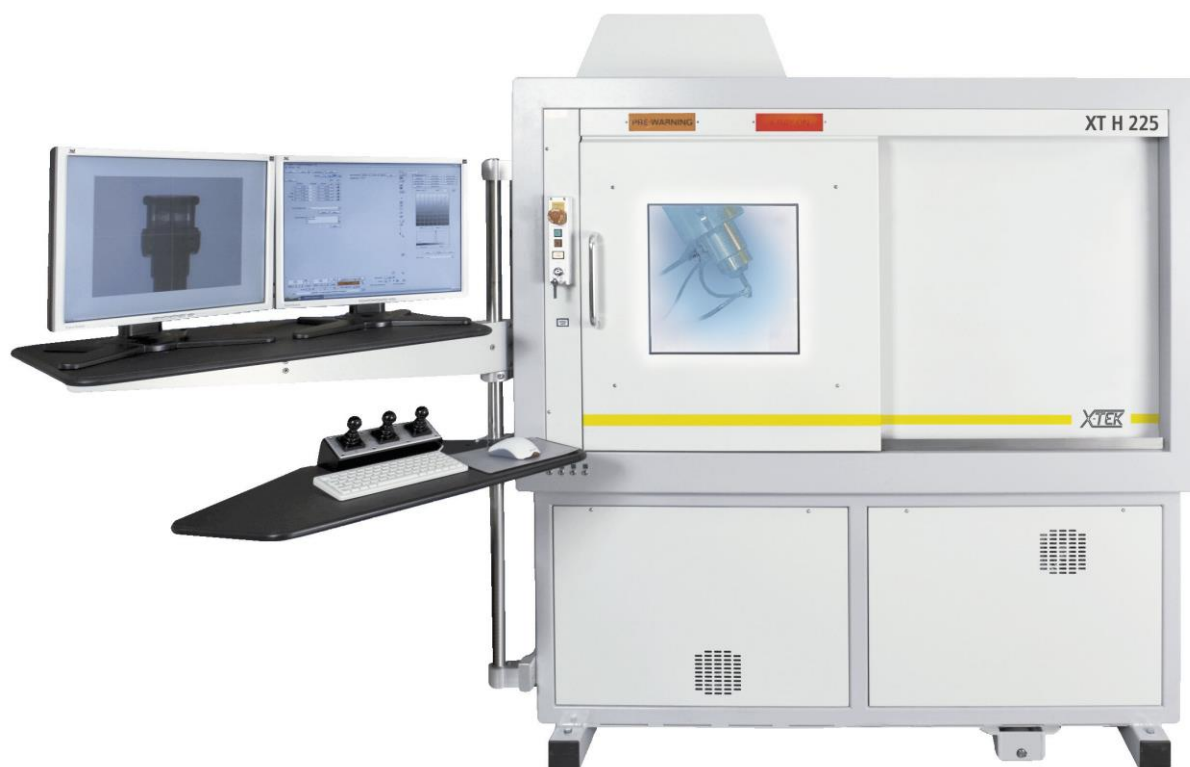
Glavne primjene su podijeljene na dvije kategorije, i prikazane u tablici 2.

Tablica 1. Primjena CT [3]

Nerazorna ispitivanja	Mjeriteljstvo
analiza grešaka	usporedba s CAD modelom
detekcija i mjerenje pukotina	nerazorna unutarnja mjerenja
provjera sklopova	reverzibilno inženjerstvo
detekcija poroznosti i analiza	3D analiza volumena
analiza gustoće i strukture	prva kontrola kvalitete

3. Dijelovi CT sustava za dimenzionalna mjerenja

CT sustav sastoji se od izvora rendgenskih zraka, rotacionog stola, detektora rendgenskih zraka te jedinica za obradu (računanje, vizualizaciju i analizu) podataka mjerenja dobivenih snimanjem. U CT sustavu se još nalaze i jedinice za zaštitu od zračenja i sustav za hlađenje.



Slika 3. CT sustav za dimenzionalna mjerenja Nikon XT H 225

3.1. Hardware

3.1.1. Izvor rendgenskih zraka

Rendgenske zrake je otkrio Wilhelm Conrad Röntgen 1895. godine. One su područje elektromagnetskog zračenja s valnim duljinama od 10 nm do 0,01 nm, što približno odgovara području između ultraljubičastog i gama zračenja. Manja valna duljina odgovara većoj energiji prema izrazu :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1.)$$

Gdje je :

h - Planckova konstanta i iznosi $6,64 \times 10^{-34} \text{ Js}$

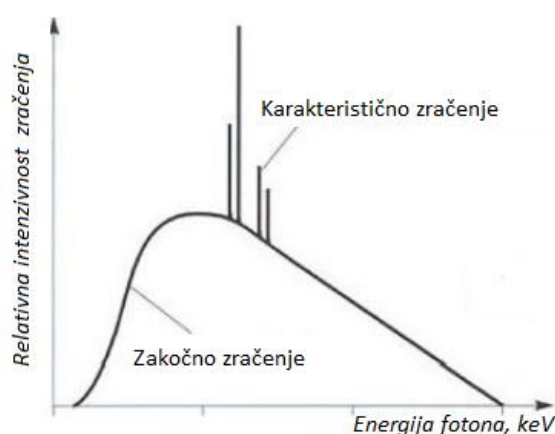
c - brzina svjetlosti i iznosi $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

E - energija svakog fotona

Dijele se na meke i tvrde, s obzirom na mogućnost prodiranja kroz razne materijale [4].

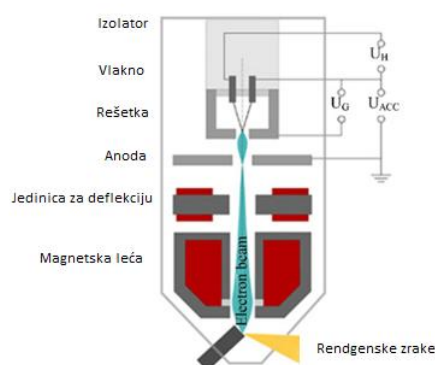
- Meke rendgenske zrake – valna duljina od 0,1 nm do 10 nm (0,12 do 12 keV)
- Tvrde rendgenske zrake – valna duljina od 0,01 nm do 0,1 nm (12 do 120 keV) [4]

Rendgensko zračenje nastaje kada elektroni velikom brzinom udaraju u metal, pri čemu dolazi do njihovog naglog usporavanja i izbijanja elektrona iz unutarnjih ljuski atoma metala. Dobiveno rendgensko zračenje se sastoji od zakočnog zračenja, s kontinuiranim spektrom intenziteta po različitim valnim duljinama. Izbacivanjem elektrona iz atomskih ljuski nižih energetske razina brzim elektronima koji udaraju u metal, te popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima iz viših energetske razina, nastaje rendgensko zračenje sa samo nekoliko valnih duljina, karakterističnih za kemijski element (metal) od kojeg je anoda. To je karakteristično zračenje s linijskim spektrom [3][4].



Slika 4. Spektar rendgenskog zračenja [1]

Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka sastoji se od izbacivača elektronskih zraka koji se sastoji od katodnog vlakna koje emitira elektrone, anode koja ubrzava elektrone, Wehneltove elektrode za kontrolu elektronskih zraka, te magnetskih deflektora i leća za fokusiranje elektronskih zraka na mjesto gdje će se generirati rendgenske zrake. Prilikom udaranja elektrona s materijalom, brzi elektroni rapidno usporavaju, što za posljedicu ima pretvaranje njihove energije u toplinu i rendgenske zrake ($< 1\%$). Za dobivanje oštih slika potreban je mali elektronski snop zraka i mjesto gdje dolaze rendgenske zrake. Napon i jakost električne struje su bitni čimbenici za kontroliranje proizvedenih rendgenskih zraka. Napon određuje spektar rendgenskog zračenja. Povećanjem napona smanjuje se valna duljina zraka koje su emitirane, te povećanjem jakosti struje prvi konstantoj napona pojačava se njihov intenzitet bez promjene u spektru [1].



Slika 5. Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [2]

Cijevi se razvrstavaju u unipolarne i bipolarne cijevi za rendgenske zrake. Bipolarni oblik cijevi može raditi pri naponima do čak 450 kV, dok kod unipolarnog oblika može samo do 300 kV.



Slika 6. Unipolarni oblik cijevi



Slika 7. Bipolarni oblik cijevi

3.1.2. Detektori rendgenskih zraka

Detektori zraka se koriste za mjerenje prijenosa rendgenskih zraka kroz objekt pri bilo kojoj putanji zraka. Njihova funkcija je pretvaranje rendgenskog toka u električni signal, što se zatim može obrađivati sa standardnim tehnikama [3]. Danas se koriste detektori u obliku :

- ravnih ploča koji se sastoje od 2D mreže piksela



Slika 8. Detektor izveden u obliku ravne ploče

- linijski, ili detektori u obliku zakrivljenih linija koji se sastoje od 1D mreže piksela [1]

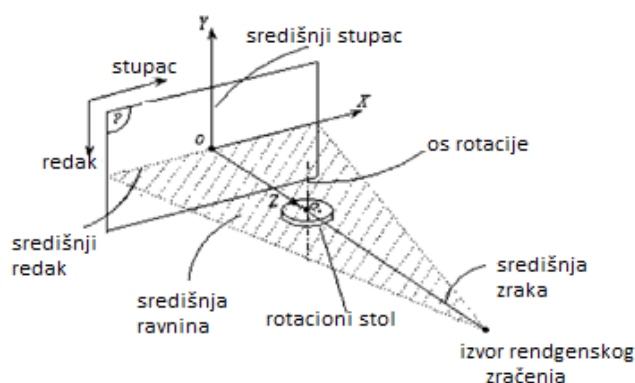


Slika 9. Linijski detektor

1D linijski detektori imaju veću točnost, efikasniji su i otporniji su većim razinama energije rendgenskih zraka što omogućuje mjerenje debljih komada. Unatoč tome, njihovo korištenje je vremenski zahtjevno pošto se mjeri samo jedan odsječak tijekom jedne rotacije objekta i za mjerenje novog odsječka potrebno je pomicanje objekta u smjeru Y-osi. Kod detektora u obliku ravnih ploča jedna rotacija objekta obično je dovoljna [1].

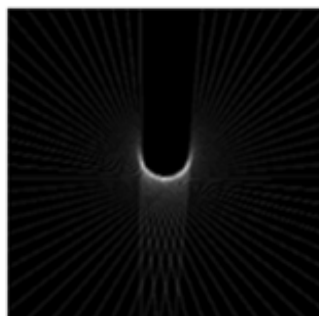
3.1.3. Rotacioni stol

Prilikom skeniranja, objekt se dovodi u zahvat na rotacionom stolu. Krivo postavljanje glavnih osi sustava može dovesti do grešaka u skenovima. Idealno postavljanje geometrije sustava prikazano je na slici 10 [3].



Slika 10. Postavljanje geometrije sustava prilikom skeniranja [3].

Središnja zraka presijeca sredinu detektora (točka O); rotacijska os je okomita na središnju ravninu, i središnja ravnina presijeca detektor u središnjem retku. Zbog odstupanja detektora, izvora zraka i rotacionog stola različite greške se mogu pojaviti na snimcima. Neki od primjera dani su na slikama 11 i 12 [3].



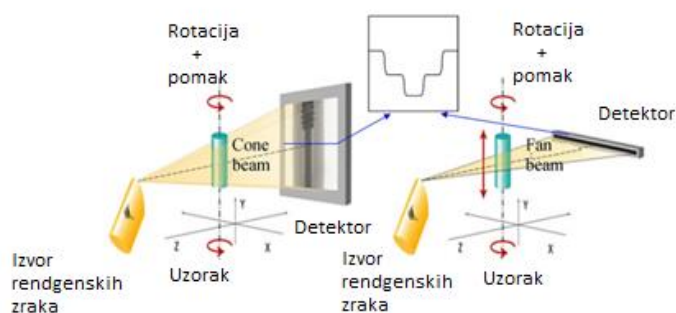
Slika 11. CT snimak s odstupanjem od 10 piksela [3]



Slika 12. CT snimak s odstupanjem pomaka oko x- osi detektora [3]

3.1.4. Kinematski sustav

U medicinskom CT sustavu, vakuumska cijev i detektor neprestano rotiraju oko objekta tj. pacijenta, dok je pacijent horizontalno translaticiran kroz prostor između cijevi i detektora. U industrijskom CT sustavu, cijev i detektor su obično fiksirani, dok objekt snimanja rotira u prostoru između cijevi i detektora, ili bez translacijskog gibanja (kod 2D detektora), ili s vertikalnim pomakom (kod 1D detektora). Osnovni način postavljanja osi na industrijskim skenerima prikazan je na slici 13 [2].



Slika 13 Postavljanje osi na industrijskim skenerima [2]

Kinematski sustav obično se sastoji od :

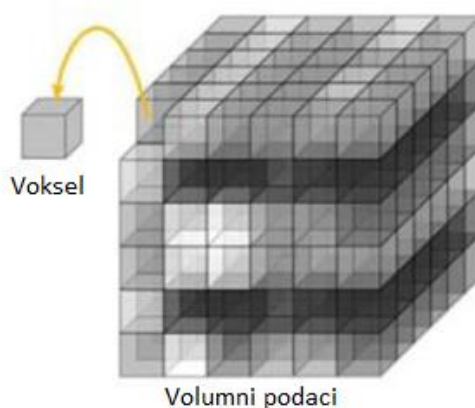
- 1) Rotacionog stola za kontinuirano okretanje objekta
- 2) Horizontalne translacijske osi za pozicioniranje objekta između izvora i detektora

- 3) Horizontalne translacijske osi u smjeru osi x da se stol, tj. objekt pomiče paralelno s detektorom
- 4) Vertikalne translacijske osi koja pomiče stol i objekt [2]

3.2. Softver

3.2.1. Softver za 3D rekonstrukciju i detekciju rubova

Obrada snimaka sa detektora se sastoji od dva koraka : rekonstrukcije 2D snimaka u 3D vokal model, te provođenja mjerenja u zasebnome softveru (uključujući detekciju rubova, segmentaciju snimaka). Nakon što je snimanje završeno, pomoću rekonstrukcijskih algoritama se provodi rekonstrukcija 3D prikaza. 3D snimci su načinjeni od voksel. Vokseli su primitivni elementi 3D struktura. Veličina jednog voksel je funkcija veličine piksela i udaljenosti između objekta i detektora [3].



Slika 14. Definicija voksel [3]

Rekonstrukcija se obično odvija preko filtrirane projekcije unatrag, koja je bazirana na linearnoj integralnoj transformaciji; matematičkom modelu kojeg je razvio J. Radon 1917. godine. Ulazne varijable u rekonstrukciji su profili sivih vrijednosti, koji predstavljaju razvoj intenzivnosti po pikselima koji se nalaze na jednoj liniji detektora (npr. pikseli koji leže u XZ dijelu objekta). U slučaju korištenja konusnog izvora rendgenskih zraka, treba uzeti u obzir da vokseli ne ostaju u istoj horizontalnoj ravnini prilikom rotacije objekta. U tom slučaju rekonstrukcija se bazira na Feldkampovom algoritmu. Ovakav način rekonstrukcije je osjetljiv na horizontalno odstupanje od izvora, rotacijske osi i detektora, te je potrebno često podešavanje i prikladno uklanjanje grešaka. Nakon rekonstrukcije se detektiraju rubovi ili se obavlja segmentacija čime

se određuju sučelja između čvrstog materijala i okružujućeg zraka, ili između različitih čvrstih materijala. Pomoću detekcije rubova 3D voksel podaci se prevode u podatke o 3D površini. Postoje razne metode kojima se određuju rubovi objekta :

- Dodijeljivanje vrijednosti praga za rubne voksele
- Interpolacija između vrijednosti sivila voksel
- Traženje maksimalne derivacije vrijednosti sivila
- Traženje središnje vrijednosti sivila između razina svijetlih zračnih voksel i tamnih voksel materijala

Metoda praga bitno utječe na razlučivost. Očvrsnuće zraka (eng. *Beam hardening*) i ostale greške/artefakti mogu smetati u točnoj detekciji rubova, pošto mijenjaju vrijednost sivila rubnih piksela [1]. Većina proizvođača industrijskih CT uređaja proizvodi i software za rekonstrukciju, npr. Nikon za rekonstrukciju nudi *CT pro*, GE nudi *Phoenix Datos*.

3.2.2. Softver za vizualizaciju i dimenzionalnu analizu

Dok se software za 3D rekonstrukciju koristi u svim CT uređajima, dimenzionalni CT uređaji zahtijevaju dodatan software za izvlačenje geometrijskih podataka (kao što su ravnine, cilindri, kugle, itd.) i računanje geometrijskih podataka (pozicija, orijentacija, dimenzije, duljina, promjer, kut, mjerna nesigurnost, itd.). Dimenzionalna analiza često traži različite korake u obradi podataka :

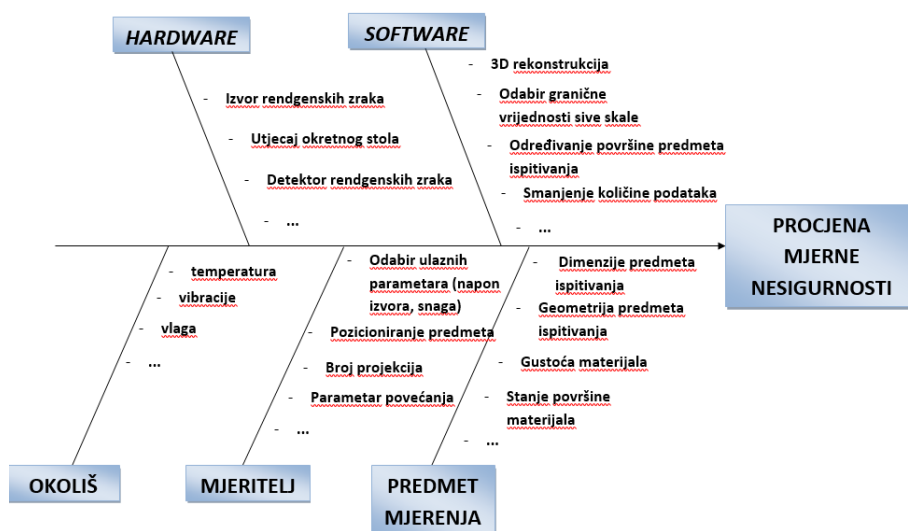
- Pretvaranje u oblak točaka
- Glatke površinske modele
- Geometrijske značajke CAD modela na kojima se može provesti dimenzionalna analiza [1]

To iziskuje posebnu obradu podataka i poseban softver za analizu. Softver bi trebao biti u mogućnosti podržavati većinu dimenzionalnih mjerenja u tradicionalnim softverskim paketima za koordinantne mjerne sustave [1]. Postoje razni softverski paketi za volumetričku vizualizaciju rekonstruiranih podataka. Većina tih paketa nude osnovne funkcije kao što su vizualizacija i segmentacija. Neki od komercijalnih paketa su : *VGStudio Max*, *Avizo*,

Simpleware. Postoje i besplatni softverski paketi kao što su : *Drishiti*, *VolPack*, *ImageJ*, *Visualization Toolkit (VTK)*, *Paraview*.

4. Utjecajni parametri CT sustava

Glavni nedostatak metode dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom jest izostanak mjeriteljske sljedivosti. Mjeriteljska sljedivost jest svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom, kod dimenzionalnog mjerenja to je jedinica duljine metar, neprekinutim lancem umjeravanja, od kojeg svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Ono što je ključno kod uređaja za mjerenje računalnom tomografijom jest postojanje mnoštva ulaznih veličina, takozvanih utjecajnih parametara, od kojih se zahtjeva da utvrđeni iznosi svakog pojedinog parametra budu sljedivi do definicije jedinice ili pripadajućeg referencijskog etalona kako bi se mogla garantirati sljedivost rezultata dobivenog mjerenjem. Slika 15. prikazuje utjecajne parametre po skupinama [5].



Slika 15. Ishikawa dijagram utjecajnih parametara CT uređaja u dimenzionalnom mjeriteljstvu

4.1. Meta zračenja

Meta rendgenskog zračenja karakterizirana je njenim tipom (prijenosna, reflektivna, rotacijska) i materijalom (volfram, bakar, molidben,...). Različiti materijali znače i različiti protonski broj. Međusobna djelovanja emitiranih elektrona sa atomima materijala mete su povezana s protonskim brojem materijala mete, što utječe na spektar zračenja na razne načine, kao npr. na

intenzivnost karakterističnog i zakočnog zračenja (veći protonski broj znači i veću intenzivnost), te na kvalitetu zračenja (npr. snagu prodiranja rendgenskih zraka). Materijal mete trebao bi biti odabran tako da odgovara uvjetima rada. Neki proizvođači CT uređaja nude glatke više-materijalne mete koje mogu biti indeksirane da postepeno mjere sa različitim spektrom. Prijenosne mete omogućuju dobar kružni izvor rendgenskih zraka. No one ne podržavaju gustoće velike energije. Rotacijske reflektivne mete omogućuju povećanje toka elektrona bez razaranja mete. Neki CT uređaji posjeduju dvostruke cijevi ili glave s različitim metama [2].

4.2. Snaga izvora

Snaga izvora rendgenskih zraka ovisi o jakosti električne struje i naponu koji se daju elektronskim zraka koje udaraju u metu i stvaraju rendgenske zrake. Jakost električne struje (μA) jednaka je brzini prijenosnika naboja (npr. elektronima) koji teku od vlaknastog izvora do mete. To direktno utječe na intenzivnost rendgenskog zračenja (veličinu radijacijske energije), no ne i na kvalitetu rendgenskih zraka (snagu prodiranja). Napon (kV) utječe na raspodjelu energije (maksimalni napon, kvalitetu, prodiranje) i na intenzivnost (količinu rendgenskih zraka). Na kvalitetu utječe zbog toga što napon određuje najveću energiju fotona a time i snagu prodiranja. Snaga je opisana sljedećim izrazom :

$$P = U \cdot I \text{ (W)} \quad (4.1.)$$

Gdje je :

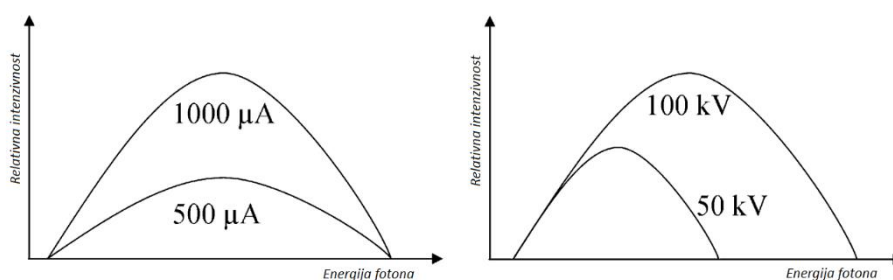
P – snaga izvora

U – napon

I – jakost struje

Odabir primjerenog napona i jakosti struje za svako mjerenje predstavlja težak zadatak. Napon bitno mijenja spektar rendgenskog zračenja produljujući ga do iznosa postavljenog napona, a s time dolaze i nove specifične amplitude zračenja u spektru. Birajući postavke potrebno je uzeti u obzir i materijal ispitivanog predmeta, gustoću i geomteriju. Oblik objekta, veličina i struktura materijala se mogu puno razlikovati ovisno o kojem se objektu radi u dimenzionalnom CT mjeriteljstvu, za razliku od medicinskog CT-a gdje je objekt uvijek čovjek. To često dovodi do kontradiktornih graničnih uvjeta. Napon bi trebao biti dovoljno velik da se izbjegne nestajanje

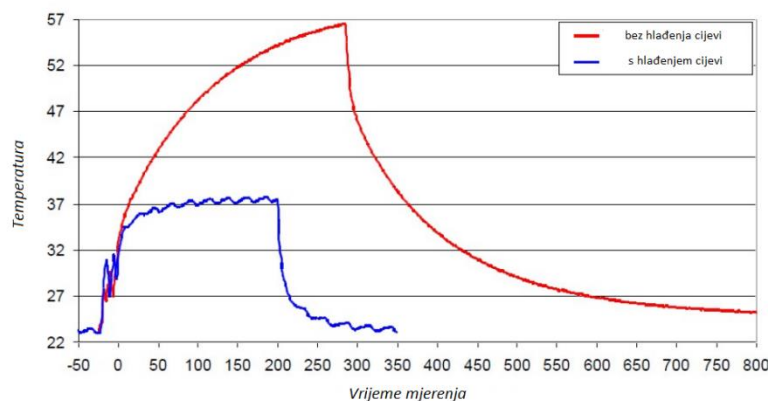
rendgenskih zraka u smjeru gdje se prodire najveća koncentracija materijala, no isto tako to može dovesti do gubitka u kontrastu snimka ili zasićenja detektora u smjeru gdje je manja koncentracija materijala. To je jedan od problema koji se javljaju prilikom mjerenja proizvoda koji imaju veću debljinu u jednom smjeru manju u drugom, ili imaju produljene vanjske ili unutarnje karakteristike, te prilikom mjerenja proizvoda sastavljenih od više materijala. Rješenje ovog problema je u provođenju više mjerenja s različitim vrijednostima jakosti struje ili snage prije spajanja vrijednosti sivila koje se dobiju pri različitim postavkama snage [2].



Slika 16. Utjecaj jakosti struje i napona na intenzivnost [2]

4.3. Utjecaj temperature

Jedna bitna razlika između CT analize materijala, medicinskoj primjeni i primjeni u dimenzionalnom mjeriteljstvu je u tome što je temperatura bitan čimbenik samo u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Standard u dimenzionalnom mjeriteljstvu za temperaturu je 20°C i odstupanje od ove temperature dovodi do velikih izvora grešaka. U medicini je nemoguće dovesti žive organizme do te temperature, isto tako i u analizi materijala materijale. Kontrola temperature u dimenzionalnom CT-u je jako nezgodna u odnosu na druge duljinske ili koordinantne mjerne sustave, zato što industrijski CT uređaji sadrže barem jedan veliki izvor topline unutar sebe (npr. izvor zračenja, motor, detektor, elektronika). Mjerenja su moguća jedino ako su svi elementi na jednolikim i stabilnim temperaturama, obično $20 \pm 0,1 - 0,5^{\circ}\text{C}$, te ako se kompenzacija grešaka primjenjuje ne samo za derivacije od standardne temperature nego i za temperaturne gradijente koji se mogu pojaviti oko temperature. Nužno je imati termički stabilan CT uređaj i omogućiti vremenski period potreban da uređaj i njegovi ostali elementi postignu jednoliku temperaturu od 20°C [2].



Slika 17. Utjecaj temperature na stabilnost materijala mete [3]

4.4. Položaj, geometrija, orijentacija i materijal objekta

Objekt je fiksiran na rotacionom stolu na način da mu je spriječeno bilo kakvo gibanje (translacijsko ili rotacijsko) na stolu. Orijehtacija mjerenog objekta utječe na duljinu puta kojeg rendgenske zrake prođu kroz njega prilikom njegove rotacije. Prilikom veće promjene duljine moguće je slaba i nepotpuna rekonstrukcija snimaka, zbog netočne izloženosti rekonstruiranih projekcija. Neki snimci mogu biti pretamni, a neki presvijetli zbog različitih duljina rendgenskih zraka. Obje situacije treba izbjegavati; za dobar rezultat mjerenja potrebno je da su svi snimci dobro izloženi zračenju. Ukoliko to nije postignuto pojavljuju se artefakti na skenovima, pa zato korisnik mora pozicionirati objekt, ako je moguće, na takav način da je duljina koju rendgenska zraka prevali kroz objekt jednoliko raspoređena pri svim kutevima skeniranja.

Način na koji su rendgenske zrake prigušene prolazeći kroz objekt uvelike ovisi o materijalu objekta i njegovom koeficijentu prigušenja. Prigušenje pri naponima od 20-450 kV, koji su tipični za industrijske CT uređaje, događa se zbog fotoelektričke apsorpcije i Comptonovog raspršenja. Fotoelektrična apsorpcija se događa kada se ukupna energija fotona prebacuje u unutarnji elektron, što za posljedicu ima izbacivanje elektrona. Kod Comptonovog raspršenja, dolazeći foton djeluje na vanjski ili slobodni elektron, i izbacuje ga. Rezultat toga je da je foton odbijen u nekom drugom smjeru s određenim gubitkom energije, koju dobiva elektron. Obje pojave su ovisne o energiji, ali kod fotoelektričke apsorpcije ta ovisnost je veća. Vjerojatnost da će se foton "izgubiti" je funkcija njegove energije.

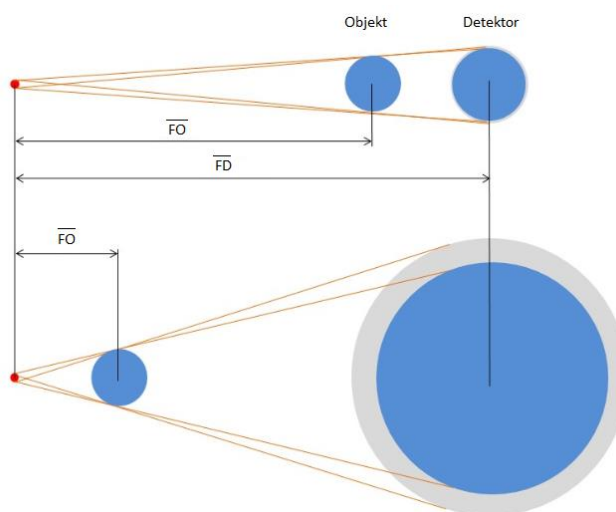
Iskusni korisnici CT uređaja nastoje naći optimalnu orijentaciju objekta minimizirajući najveću dubinu prodiranja rendgenskih zraka, tj. najveću razliku između dubine prodiranja prilikom rotacije objekta. Optimalna orijentacija bi također trebala izbjegavati površine koje su okomite na os rotacije, zato što dovodi do raspršenja i nestabilnosti u 3D rekonstrukciji [2].

4.5. Filter

Filter je predmet koji se stavlja ispred izvora rendgenskog zračenja radi smanjenja intenzivnosti određenih valnih duljina iz njegovog spektra, te selektivnog mijenjanja raspodjele valnih duljina unutar određene rendgenske zrake. Prilikom udara rendgenskih zraka u objekt, dio zrake prolazi kroz materijal, a drugi dio materijal apsorbira. Količina apsorpcije ovisi o koeficijentu masene apsorpcije materijala, i snižava se za fotone veće energije. Prava apsorpcija se događa kada rendgenske zrake dovoljne energije dovode do promjene količine energije elektrona u atomima apsorbiranog materijala. Energija iz tih rendgenskih zraka se koristi da se atomi pobude i da ne prolaze kroz materijal. Zbog toga postoje periodični skokovi u apsorpcijskim karakteristikama bilo kojeg materijala. Materijali od kojih su načinjeni filteri ovise o primjeni. Za industrijsku primjenu obično se koriste filteri načinjeni od bakra, mjedi. U medicini obično se koriste filteri od aluminija. Količina dobivene filtracije je izražena u mm. Također za dobivanje dobrih CT snimaka bitna je i debljina filtera. U industrijskoj primjeni obično se koriste filteri od 0,2 mm do 3 mm [6].

4.6. Uvećanje

Veličina vokselu utječe na razlučivost CT uređaja, a ona sama ovi o geometrijskome uvećanju, udaljenosti između piksela i promjeru izvora. Uvećanje možemo prikazati kao omjer udaljenosti između fokusa izvora i detektora \overline{FD} i udaljenosti između fokusa izvora i objekta \overline{FO} . Što više približavamo objekt izvoru uvećanje postaje veće. U idealnom slučaju potrebno je dobiti malu veličinu vokselu tako da se uzme mala vrijednost \overline{FD} ili velika vrijednost \overline{FO} . Da bi se dobila točna rekonstrukcija snimaka, svi snimci moraju ostati u polju vidljivosti tijekom snimanja. Najveće uvećanje ograničeno je omjerom širine detektora i promjerom uzorka. Prilikom kratkotrajnih mjerenja, biraju se manja uvećanja [3].



Slika 18. Utjecaj uvećanja na pojavu zamagljenja na skenu [3]

4.7. Broj projekcija i vrijeme snimanja

Broj projekcija je direktno povezan s vremenom snimanja, i u pogledu industrije interes je za manjim brojem projekcija radi ubrzavanja cijelog procesa. Na taj način troškovi se mogu efikasno smanjiti. Broj projekcija ne čini veliku razliku u kvaliteti snimaka, te zato spada u manje važne faktore utjecaja na mjernu nesigurnost. Veći broj projekcija u jednom okretu (360°) povećava kvalitete rekonstruiranih podataka, ali i uvelike povećava vrijeme snimanja. Za dobar proces obično je dovoljno uzeti od 400 do 800 projekcija, zato što odlazeći iznad tog broja pospješujemo kvalitetu za manje od 5%. Zgodno je i uzeti 720 projekcija jer time dobijemo pomak od pola stupnja po jednom stupnju okreta. Ponekad se uzima i snimanje sa samo pola rotacije tj. 180° . Do sada provedena istraživanja upućuju na velik broj utjecajnih veličina koje egzistiraju u procesu dimenzionalnog mjerenja računalnom tomografijom. Zbog činjenice da se radi o različitim sustavima i višenamjenskom uređaju za mjerenje, mjerne nesigurnosti su u mnogim slučajevima nepoznate i sljedivost mjerenja nije osigurana. Iz tog razloga sve veći naglasak stavlja se upravo na istraživanje utjecajnih parametara na krajnji rezultat mjerenja. Obzirom da je riječ o dugotrajnim procesima mjerenja i obrade podataka, naglasak se stavlja na simulacije procesa skeniranja i generiranja 3D modela. U idućem poglavlju opisan je jedan od najpoznatijih alata za simulacije skeniranja: softver aRTist, kojeg je razvio Federalni zavod za istraživanje i testiranje materijala (BAM) u Njemačkoj.

5. Simulacije u računalnoj tomografiji

5.1. Opis postupka

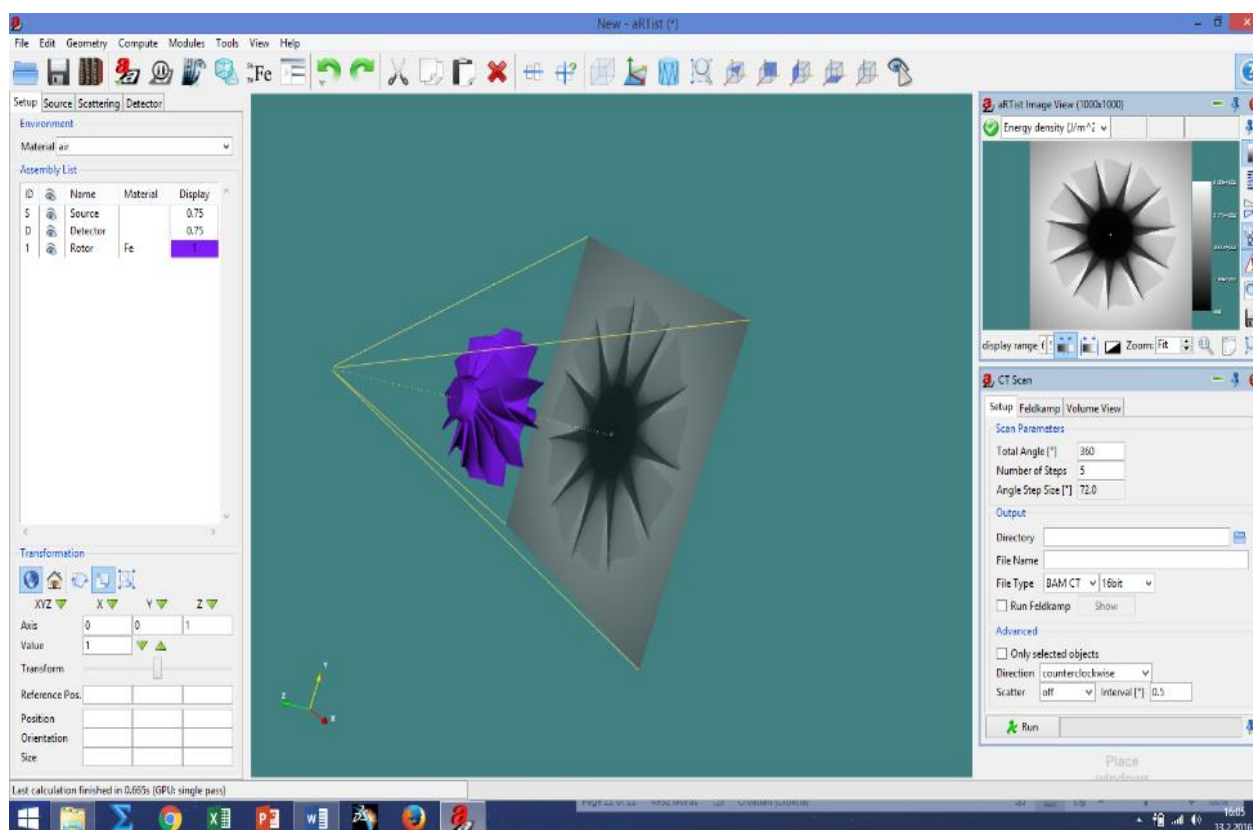
Kao što je već navedeno u prethodnom poglavlju, prilikom mjerenja proizvoda koji su deblji u jednom a tanji u drugom smjeru, imaju dulje unutarnje ili vanjske komponente, ili prilikom mjerenja proizvoda sastavljenih od više materijala (npr. kompoziti) može se javiti gubitak kontrasta ili zasićenja detektora u smjeru gdje se nalazi manje materijala. Takvi problemi obavljanjem više mjerenja sa različitim ulaznim parametrima (npr. napon, struja), sa ciljem eliminacije zasićenih ili mrtvih piksela prije spajanja vrijednosti sivila dobivenih na različitim postavkama snage.

Ako se CT tehnologija nastoji razviti u novu tehniku za mjerenje, prvo se mora odrediti mjerna nesigurnost. Istraživanja koja se bave ovim problemom su dugotrajna i skupa, i u dosta slučajeva teško ostvariva. Postoji nekoliko načina da se odredi mjerna nesigurnost. U jednom slučaju nesigurnost se mjeri pomoću statističke analize ponovljenih mjerenja proizvoda s različitim ulaznim parametrima. Drugi način je određivanje mjerne nesigurnosti pomoću simulacija. Ovaj način je jako dobar jer daje prednost u uvjetima gdje se zadaci mjerenja često mijenjaju. Pošto je mjerna nesigurnost ovisna o zadatku mjerenja, u praksi je puno lakše ostvariti 25 ili više simulacija s parametrima koji su različiti u određenim granicama, nego obaviti stvarnih 25 mjerenja pomoću CT-a. Također, moguće je dobiti set optimalnih ulaznih parametara, i prije nego što je prvo mjerenje obavljeno. Još jedna prednost simulacija je u tome što omogućuje optimizaciju razvoja CT sustava u kratkotrajnom vremenskom razdoblju. Iz pogleda znanosti, npr. mjeriteljstva, važno je shvatiti proces mjerenja kao takav. Simuliranjem CT-a, moguće je razdvojiti i povećati mjerne utjecaje koji mogu dovesti do odstupanja u dimenzijama. Time možemo smanjiti broj korekcija potrebnih za obavljanje mjerenja shvaćajući uzroke tih odstupanja. U općem slučaju, pitanje je da li korištenje simulacija dovodi do ikakvih nedostataka? Odgovor je da, postoje nedostaci. Simulatori obično nisu razvijeni da mogu simulirati uvjete za predmete kompleksne geometrije, i ne uzimaju u obzir sve utjecajne parametre. Također, simulatori uzimaju u obzir da je poznat spektar izvora zračenja, što je u stvarnosti rijetkost (osim ako je spektar izmjeren), zato što čak i izvori s istim materijalom mete i iste snage mogu imati različite spektre. Dostupni simulacijski programi obično nemaju mogućnost kvantitativnog rješenja efekta raspršenja rendgenskih zraka što je bitno kod mjerenja pri većim energijama (>250 keV). Točnost simulacijskog procesa samog po sebi se mora ispitati [2][7].

5.2. aRTist

U okviru ovog završnog rada bit će prikazano korištenje jednog simulatora industrijskog CT-a po nazivu aRTist. ARTist je računalni simulacijski program koji služi za kvantitativno opisivanje radiografskih testiranja (izvora zračenja, prigušenja, rendgenskog filma, grešaka,...). Razvio ga je njemački BAM (Federalni zavod za istraživanje i testiranje materijala). Ovaj računalni alat radi na principu generiranja realističnih radiografskih prikaza na bazi CAD modela i postavljenih radioloških parametara. U sebi sadrži dodatne module koji omogućuju i rekonstrukciju 2D snimaka. Nakon rekonstrukcije dobivene datoteke mogu se učitati, kao i kod rekonstrukcije na CT uređajima, u prikladni softver za dimenzionalnu analizu (npr. *VGStudio*).

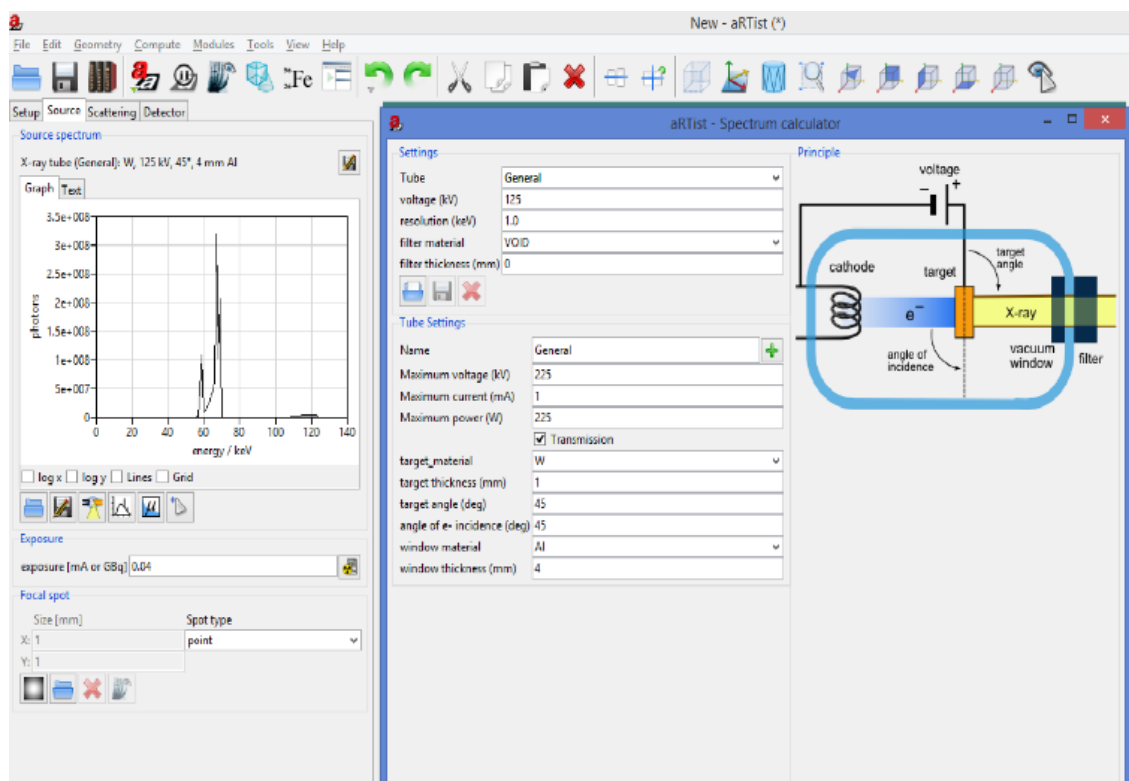
5.2.1. Korisničko sučelje aRTist-a



Slika 19. Korisničko sučelje aRTist-a

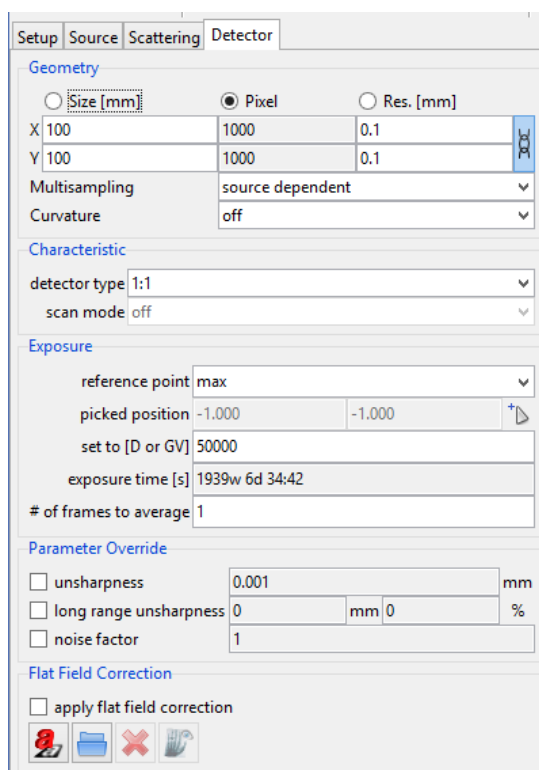
Na slici 19 prikazano je sučelje programa. Na lijevoj strani nalaze se četiri tab-a; *Setup*, *Source*, *Scattering*, *Detector*. U tabu *Setup* moguće je postaviti postavke izvora, detektora, te objekata

snimanja, te okoliša (pozicija, materijal, veličina). Drugi tab *Source* omogućuje nam postavljanje svih parametara vezanih uz sam izvor zračenja (napon, jakost struje, materijal mete, itd.), što je prikazano na slici 20.



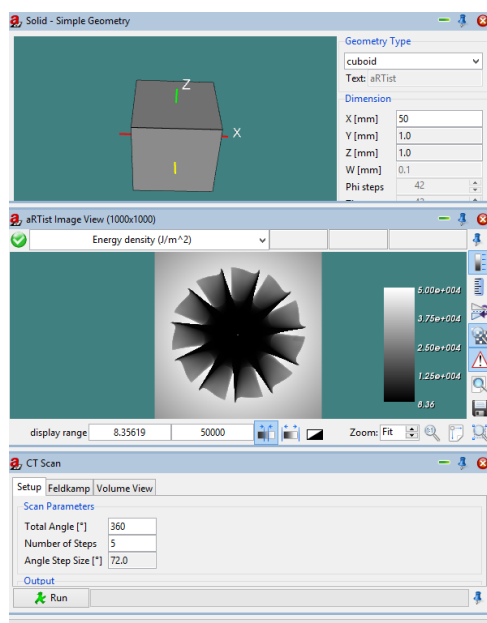
Slika 20. Postavke izvora zračenja u aRTist-u

Četvrti tab *Detector* omogućuje postavljanje parametara vezanih uz detektor kao što su veličina, broj piksela, razlučivost, tip detektora, biranje mjesta najvećeg ozračivanja, što je prikazano na slici 21.



Slika 21. Parametri detektora u aRTist-u

Tab *Scattering* nije korišten u okviru ovog završnog rada, no pomoću njega se opisuje raspršenje prilikom CT snimanja. Moduli koji se mogu koristiti su : *CTScan*, *DigRad*, *ImageViewer*, *LogViewer*, *McRay*, *Solid*, *Tomosynth*. Za potrebe ovog završnog rada korišteni su moduli *CTScan*, *ImageViewer* i *Solid*.



Slika 22. Moduli CTScan, Solid, ImageViewer u aRTist-u

5.2.2. Geometrijski model

Simulacija modelira stvarno skeniranje objekta tako da definira virtualni slučaj. Osim izvora zračenja i detektora, jedan ili više geometrijskih dijelova se mogu postaviti slobodno u prostoru unutar programa. Dijelovi su modelirani pomoću trianguliranih prikaza granica. Ukoliko imamo više dijelova, njihova važnost određena je njihovim rednim brojem. To nam omogućuje fleksibilnu detekciju grešaka koje su neovisne o okružujućem materijalu. Da bi se odredilo prigušenje zračenja, potrebno je izračunati dubine prodiranja rendgenskih zraka kroz povezanost između izvora i piksela na detektoru. U tu svrhu razvijeno je efikasno praćenje rendgenskih zraka što omogućuje rukovođenje realističnih uređenja snimanja pri kratkom vremenu, unutar programa. Ova verzija aRTist-a je druga po redu, pa je u njoj praćenje rendgenskih zraka puno efikasnije i vremena računanja su puno brža nego u prvoj verziji. Tako da je moguć rad s modelima koji sadrže nekoliko desetaka milijuna trokuta, istovremeno generirajući isto toliko piksela u manje od minutu [8].

5.2.3. Model procesa prodiranja rendgenskih zraka

Radiografski proces može se podijeliti u tri neovisna dijela : stvaranje zračenja, međudjelovanje i detekcija. Prilikom radiografske simulacije model stvaranja zračenja treba opisati intenzivnost na izvoru, spektar i veličinu fokusne točke. Za većinu tablica izotopa aRTist sam nudi modele spektara, no spektar je moguće namjestiti na željeni u postavkama cijevi. Ukoliko se javlja više izvora u isto vrijeme opisuje se produljena fokusna točka. Detaljno rješenje međudjelovanja materijala s njegovim stohastičnim procesima apsorpcije i raspršenja je teško i vremenski dugotrajno. Prijenosne funkcije, kao što su karakteristične krivulje filma za različite tipove filmskih klasa, se koriste da bi se opisala svojstva različitih detektora. Unutarnja neizoštrjenost se simulira pomoću Gaussovog filtriranja. Šumovi se dodaju slici uzimajući u obzir ovisnost o vrijednosti sivila [8].

5.2.4. Prednosti i nedostaci korištenja simulacija

Smisao korištenja simulacija u odnosu na eksperimentalna mjerenja leži u tome da se nedostaci CT uređaja izbjegnu. Najveća prednost simulacija u odnosu na stvarna skeniranja je u vremenskome trajanju obavljanja simulacije u odnosu na klasično mjerenje. U aRTist-u se

moгу obaviti oba procesa vezan uz industrijski CT – proces skeniranja objekta i proces modeliranja 3D prikaza iz dobivenih snimaka. U stvarnosti ta dva procesa zajedno mogu potrajati nekoliko sati, i više. Trajanje skeniranja ovisi o broju zadanih projekcija, a što je više projekcija, to je i model veći, pa je dugotrajniji i proces rekonstrukcije. Npr. snimanje u 720 projekcija traje oko 50 minuta, a generiranje takvog modela 10-20 minuta. Simuliranjem istog takvog procesa na malo boljem računalu vremenski opseg se uvelike smanjuje. Snimanje objekta traje oko 30 sekundi, a generiranje modela nekoliko minuta. Uzevši u obzir snimanje većih objekata, ili snimanje s većim brojem projekcija to je velika prednost.

Prije snimanja na CT uređaju potrebno je odraditi nužne radnje koje uključuju *homing* (namještanje rotacionog stola) te kondicioniranje uređaja (postizanje stanja stabilnosti izvora rendgenskih zraka) koje obično traju oko sat vremena. Također snimanjem se troši detektor, tj. povećavaju se troškovi održavanja. Isto tako cijena softvera je oko 5000 EUR dok se cjenovni rangovi pravih uređaja kreću i po nekoliko stotina tisuća eura.

Kako je računalna tomografija u dimenzionalnom mjeriteljstvu nova metoda mjerenja kod koje mjeriteljska sljedivost još uvijek nije osigurana, istraživanja u području definiranja mjerne nesigurnosti, a time i osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja trenutno su u jeku. Korištenje simulatora uvelike bi ubrzalo takva istraživanja na polju osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja što je nužan preduvjet komercijalne uporabe CT-a u području dimenzionalnog mjeriteljstva.

Što se tiče nedostataka u samome programu tu spada nemogućnost skeniranja heterogenih materijala, ne mogu se skenirati svi materijali koji se koriste u industriji (npr. plastika). U okviru ovog završnog rada koristila se evaluacijska licenca za aRTist te su se stoga javljali i određeni problemi tako da je teško odrediti učinkovitost programa. Još jedna bitna stvar je teško nalaženje ikakvih informacija u svezi korištenja samoga programa. Program nije namijenjen za širu publiku pa je teško riješiti probleme koji dolaze prilikom korištenja putem klasičnih načina (npr. *Google*, *Youtube*).

6. Eksperimentalni dio

Svrha ovog završnog rada je pokazati odnos između simuliranih uvjeta mjerenja te stvarnih. Ovo poglavlje bavi se analizom dimenzija aluminijskog cilindra, koje je obavljeno pomoću simulacija, te na stvarnom CT uređaju. Na slici 23 prikazan je oblik cilindra koji se mjerio.



Slika 23. Aluminijski cilindar

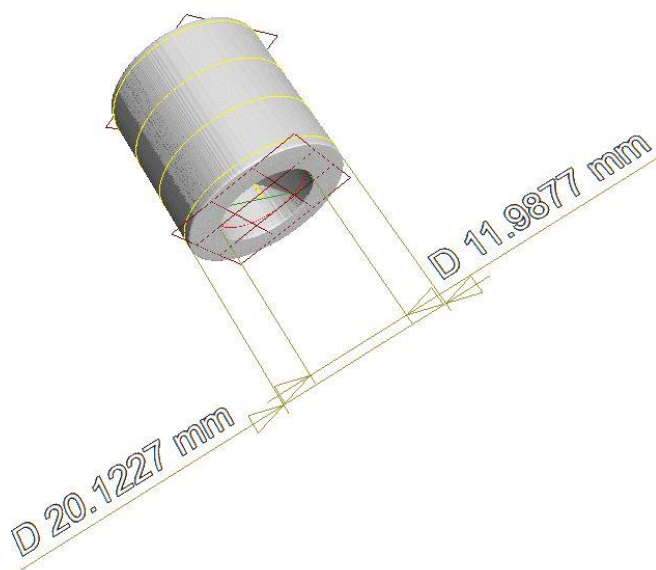
6.1. Dimenzionalna analiza pomoću simulacija

Prilikom provedbe simuliranih uvjeta korišten je simulator aRTist čije su karakteristike i način korištenja opisane u prethodnom poglavlju. Mjerenja su obavljena tako da su zadani određeni parametri koji su konstantni tokom mjerenja, dok se jedino mijenja udaljenost cilindra od izvora. Mjerenje se ponovilo 10 puta pri različitim udaljenostima. Parametri koji su konstantno zadani su dani tablicom 2.

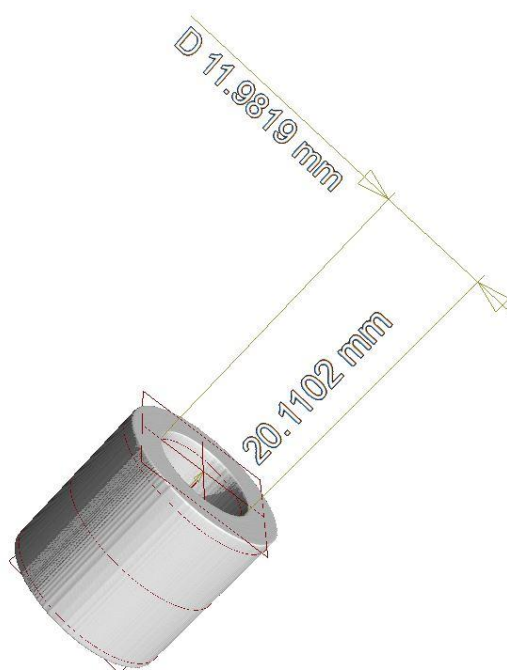
Tablica 2. Konstantni parametri prilikom mjerenja

Napon	Jakost struje	Snaga	Broj projekcija
kV	μA	W	-
130	30	3,9	1000

Nakon provedbe simulacija modeli su ubačeni u *VGStudio* radi analize dimenzija. Kvaliteta dobivenih modela i dimenzije mogu se vidjeti na slikama 24 i 25.



Slika 24. Dimenzije promjera pri udaljenosti od 200 mm



Slika 25. Duljina i vanjski promjer pri udaljenosti od 300 mm

Analizom u softveru provjerene su dimenzije vanjskog i unutarnjeg promjera, duljina, paralelnost i koncentričnost. Rezultati su dani tablicom 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja pomoću simulacija

Udaljenost predmeta od izvora zračenja (mm)	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Vanjski promjer (mm)	20,1228	20,136	20,1132	20,0984	20,0828	20,06	20,1886	20,0876	20,1466	20,0875
Unutarnji promjer (mm)	11,9877	11,9857	11,9819	11,976	11,975	11,9728	11,9692	11,9627	11,973	11,971
Duljina (mm)	20,167	20,1108	20,1102	20,0957	20,1077	20,1077	20,084	20,0928	20,1152	20,1222
Paralelnost	0,05477	0,0422	0,0368	0,024	0,04	0,0283	0,0497	0,0252	0,0768	0,0671
Koncentričnost	0,112	0,1138	0,1313	0,1515	0,0875	0,0834	0,1415	0,0849	0,1361	0,1166

6.2. Dimenzionalna analiza pomoću CT uređaja

Da bi usporedili rezultate simulacija potrebno je provesti i mjerenja na CT uređaju, pri istim zadanim parametrima. U eksperimentalne svrhe korišten je CT uređaj Nikon XT H 225 koji se nalazi u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Značajke ovog CT uređaja dane su tablicom 4, a njegov prikaz slikom 3 (str. 7).

Tablica 4. Značajke CT uređaja Nikon XT H 225 [9]

Izvor zračenja	225 kV mikrofokus, refleksijska meta
Najveći napon	225 kV
Najveća snaga	225 W
Veličina točke zračenja	3 μm
Uvećanje	> 150x
Sustav za skeniranje	Varian 2520 detektor u obliku ravne ploče
Manipulator	5 osi
Hod osi	(X) 185 mm
	(Y) 280 mm
	(Z) 730 mm
Nosivost uzorka	15 kg
Dimenzije	(1830 x 875 x 1987) mm
Težina	2400 kg

Parametri, dakle, su ostali isti, a mjerenje je obavljeno na 5 različitih udaljenosti objekta od izvora. Rezultati mjerenja dani su tablicom 5.

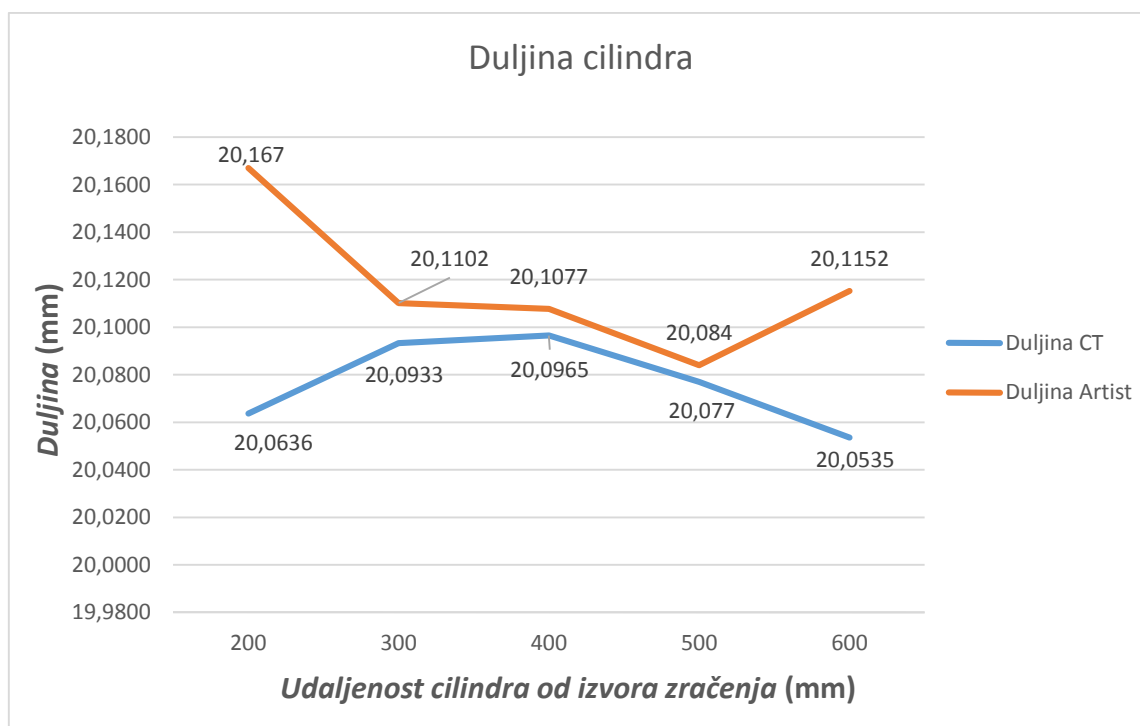
Tablica 5. Rezultati mjerenja na CT uređaju Nikon XT H 225

Udaljenost predmeta od izvora zračenja (mm)	200	300	400	500	600
Vanjski promjer (mm)	20,091	20,0972	20,0914	20,0768	20,0544
Unutarnji promjer (mm)	12,0358	12,0546	12,0632	12,0703	12,0676
Duljina (mm)	20,0636	20,0933	20,0965	20,077	20,0535
Paralelnost	0,0525	0,0508	0,0499	0,0727	0,0742
Koncentričnost	0,0027	0,0027	0,007	0,0074	0,0096

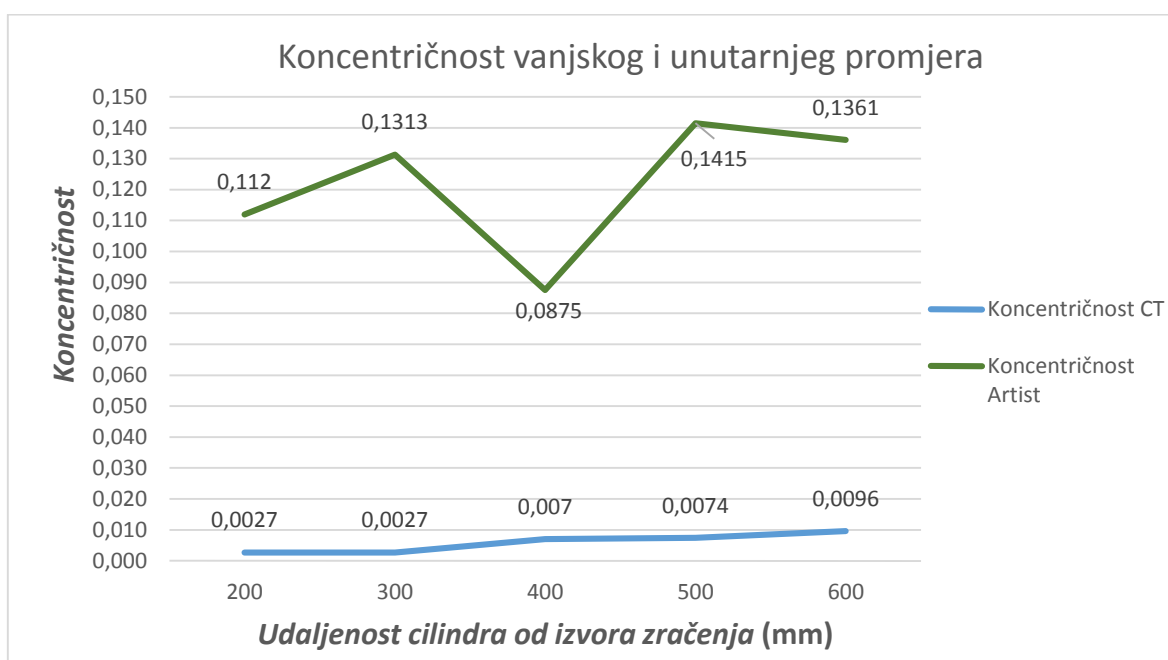
6.3. Usporedba rezultata dobivenih simulacijama i CT mjerenjima

6.3.1. Duljina i koncentričnost

Dobivene rezultate potrebno je usporediti. Pošto tablice ne daju osjećaj za međusobni odnos između dvaju rezultata mjerenja rezultati se mogu usporediti grafički, putem dijagrama. Na slikama 26 i 27 prikazani su odnosi između duljina cilindra i koncentričnosti vanjskog i unutarnjeg promjera.

**Slika 26. Usporedba izmjerenih duljina cilindra**

Vidi se da pri udaljenostima cilindra od izvora od 300 mm do 500 mm rezultati mjerenja djeluju kao da se mijenjaju u jednolikim rasponima. Iz toga zaključujemo da bi korištenje aRTist-a moglo biti pogodno za mjerenje duljine.

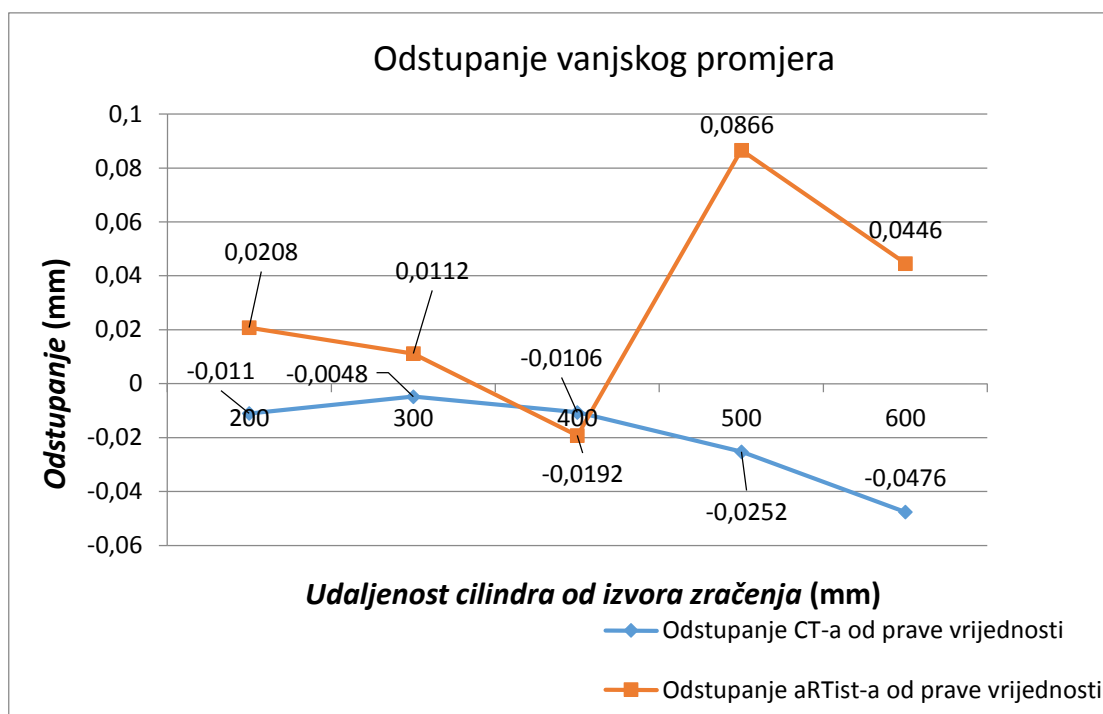


Slika 27. Usporedba koncentričnosti cilindra

CT mjerenja nam daju jednolik raspon koncentričnosti pri različitim udaljenostima cilindra od izvora, dok nam simulator daje vrijednosti u različitim amplitudama tako da je korištenje simulatora u ovu svrhu još potrebno dodatno ispitati.

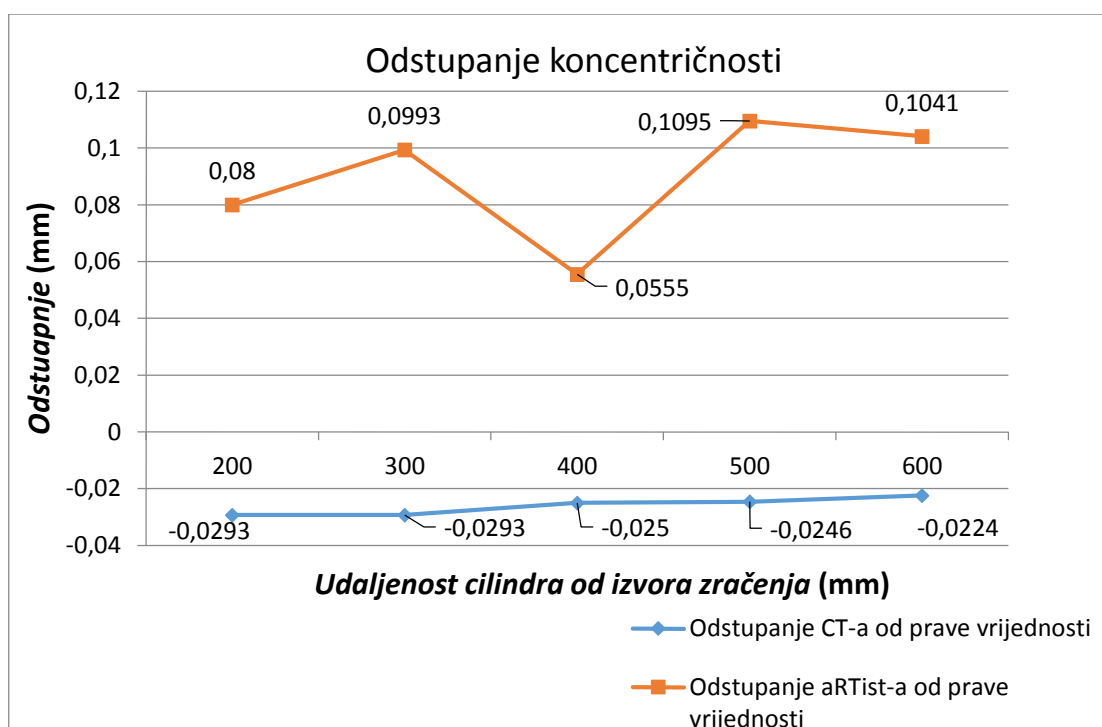
6.3.2. Odstupanja od točnih vrijednosti

Točne dimenzije dobivene su na 2D mjernom uređaju. Pomoću njih se mogu ispitati odstupanja vrijednosti koje smo dobili sa ova dva načina mjerenja od stvarnih. Slike 28 i 29 prikazuju odstupanja vanjskog promjera i koncentričnosti između vrijednosti dobivenih simulatorom i stvarnim CT mjerenjima, tj. razliku između stvarne vrijednosti i vrijednosti dobivene jednom i drugom metodom.



Slika 28. Odstupanja vanjskog promjera cilindra od prave vrijednosti

Vidi se da pri manjim udaljenostima od izvora, tj. pri većim uvećanjima objekta na detektoru, da su odstupanja u određenim granicama tolerancije, dok se pri većim udaljenostima ta odstupanja bitno razlikuju.



Slika 29. Odstupanje koncentričnosti od prave vrijednosti

Odstupanja koncentričnosti mjerenih vrijednosti sa CT-a gotovo da su linearna, dok se ona od aRTist-a ponašaju skokovito te pokazuju veće vrijednosti. Iz toga se može zaključiti da uz ovoliki raspon mjerenja aRTist možda nije pogodan za mjerenje koncentričnosti.

7. Zaključak

Računalna tomografija je i dalje novina u svijetu dimenzionalnog mjeriteljstva. Da bi se osigurali dobri rezultati mjerenja na CT uređajima potrebno je osigurati mjernu sljedivost. Mjeriteljska sljedivost definira se kao svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Pod referencom se podrazumijeva definicija mjerne jedinice, mjerni postupak ili mjerni etalon. Ukoliko se mjerna sljedivost želi uspostaviti potrebno je provesti veliki broj mjerenja pri korištenju različitih parametara. Pošto svako mjerenje iziskuje određeno vremensko razdoblje provođenje tog postupka postaje jako dugotrajno. Tu se mogu iskoristiti simulacije, pošto vremena mjerenja na simulatoru ovise o specifikacijama računala. Tako da na malo boljim računalima te simulacije traju po par minuta, što je u odnosu na mjerenju na CT uređaju koje može potrajati i do nekoliko sati, značajna prednost. Trenutno se u svijetu provode istraživanja o uspostavljanju mjerne sljedivosti kod CT uređaja te se pritom koriste i simulacije. U ovome radu opisan je postupak simuliranja CT mjernog okruženja u simulatoru aRTist. Kroz ovaj rad mogla se, ukratko objašnjeno, vidjeti prednost korištenja simulacija u odnosu na CT uređaj. Dakako iz dobivenih rezultata vide se i nedostaci, uz same nedostatke simulatora koji su navedeni u poglavlju 6. Zaključno se može reći da je simulacije potrebno koristiti sa rezervom te se ne može previše na njih oslanjati, dok god se ne uspostavi mjeriteljska sljedivost, jer trenutno one ne mogu biti zamjena mjerenju na CT uređaju.

8. Literatura

- [1] Sun, Brown, Leach, "An overview of industrial X-ray computed tomography", Queen's Printer and Controller of HSMO, Middlesex, 2012.
- [2] Kruth, Bartscher, Carmignato, Schmitt, De Chiffre, Weckenmann, "Computed tomography for dimensional metrology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 22, 2011.
- [3] M. Cantatore, "Introduction to computed tomography", DTU Mechanical Engineering, Lyngby, 2011..
- [4] "Rendgenske zrake", Wikipedija, [Mrežno]. Dostupno: https://hr.wikipedia.org/wiki/Rendgenske_zrake. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].
- [5] A. Horvatić, A. Bošnjaković, B. Runje, "Osiguravanje sljedivosti kod primjene računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu" u *Konferencija o kvaliteti*, Primošten, Hrvatska, 2015..
- [6] "X-ray filter", Wikipedia, [Mrežno]. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_filter. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].
- [7] Hilpert, Bartscher, Neugenbauer, Goebels, Weidemann, Bellon, "Simulation-aided computed tomography (CT) for dimensional measurements", Lyon, Francuska, 2007..
- [8] Bellon, Deresch, Gollwitzer, Jaenisch, "Radiographic Simulator aRTist: Version 2", BAM, Berlin, Njemačka 2012.
- [9] Nikon Metrology NV, "XT H Series", Leuven.
- [10] Welkenhuyzen, Kiekens, Pierlet, Dewulf, Bleys, Kruth, Voet, "Industrial Computer Tomography for Dimensional Metrology : Overview of Influence Factors and Improvement Strategies", Leuven, 2009..
- [11] Pavel Müller, *Influence parameters in CT scanning*, 2011.
- [12] "Computerised Information Technology Ltd.", [Mrežno]. Dostupno: http://www.cituk-online.com/acatalog/Section_BAM_ARTIST_Radiographic_Simulator.html. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].
- [13] "Industrial computed tomography", Wikipedia, [Mrežno]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_computed_tomography. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].
- [14] "Nikon Metrology", [Mrežno]. Dostupno: http://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/xray_ct/ct/xth225/index.html. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].
- [15] David K. Lehmann, Kathleen Brockdorf, Dirk Neuber, "High Resolution Computed Tomography for Metrology", Wunstorf.
- [16] J. Hiller, "Systematic Errors in Dimensional X-Ray Computed Tomography", Institut for Mekanisk Teknologi, 2012..
- [17] Dr.-Ing. Carsten Bellon, "aRTist", BAM, [Mrežno]. Dostupno: <http://artist.bam.de/>. [Pokušaj pristupa veljača 2016.].